

# 干涉型计算机产生的全息图 检验非球面镜

施志果 徐德衍 江健忠 宋德忠 周忠益

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文介绍干涉型计算机产生的全息图。提出了作图的新方法——条纹序号法,分析了记录平面上的位相分布和近似计算公式的适用范围,给出了计算机全息图质量自检的一套完整的照片,和用它检验一抛物面镜的实验结果。

## Aspheric mirror inspection by interference type computer generated hologram

*Shi Zhiguo Xu Deyan Jiang Jianzhong*

*Song Dezhong Zhou Zhongyi*

*(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)*

**Abstract:** This paper describes the interference type computer generated hologram. A new calculating and drawing method the fringe order method is proposed. The phase distribution on recording plane and the reasonable range of approximate calculation are discussed. A set of photos for testing the quality of CGH and the experimental results in testing a parabolic mirror using CGH are given.

### 一、干涉型计算机产生的 全息图——干涉型 CGH

A. W. Lohmann 在 1967 年<sup>[1]</sup>提出了计算机产生的全息图 CGH, 并已被用于检验光学系统中的非球面<sup>[2~4]</sup>。K. G. Birch 和 F. J. Green<sup>[3]</sup> 在 1972 年提出了干涉型 CGH, 它是光学全息摄影和 Lohmann 型 CGH 的综合产物。

设有非球面波面  $WAR$  沿  $z$  轴传播, 如图 1 所示。它在记录干板上的位相分布为  $WAR(x, y)_p$ ; 另有一平面波  $WO$ , 它在记录

干板上的位相分布为  $A_0 + A_1x$ 。两个波面在干板处相会, 产生干涉条纹, 干涉条纹的峰值位置应满足下式:

$$A_0 + A_1x - WAR(x, y)_p = m \cdot \lambda \quad (1)$$

式中  $m$  是整数。将干板显影定影后, 我们就得到光学全息图。再用平面波  $WO$  照明这张全息图, 就能得到再现波面  $WAR$ 。

在用计算机产生的全息图 CGH 去检验非球面光学表面时,  $WAR$  就是参考波面或叫样板波面, 这实际上是不存在的, 但是可以用数学公式来表达出来。因此, 我们可以用方程式 (1) 由计算机算出干涉条纹的峰值位

收稿日期: 1980 年 6 月 27 日。

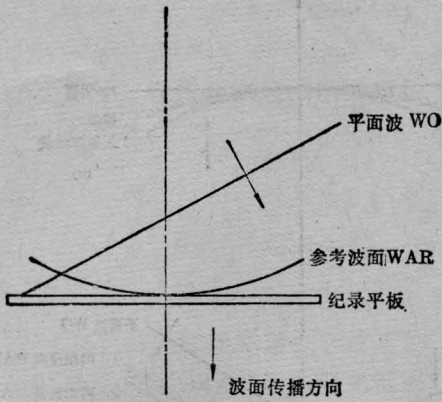


图1 全息图的产生

置轨迹。由计算机控制的画图仪画出此干涉图——全息图，再用缩微照相的方法把它缩小到所需要的精确的尺寸，从而得到计算机产生的全息图 CGH。以平面波  $WO$  照明 CGH，我们就得到原来不存在的（或原来只有数学形式的）参考波面  $WAR$ ，并用它对非球面光学表面进行零差检验（null-testing）。

## 二、实验装置

实验光路和实验装置分别示于图2和图3。这是改进型的 Twyman-Green 干涉仪。He-Ne 激光平行光束照明 CGH，产生0阶、1阶和高阶衍射波。利用成像透镜  $L$  和狭缝空间滤波器  $F$  滤出正1阶衍射波，它就是我们所需要的参考波面  $WAR$ 。

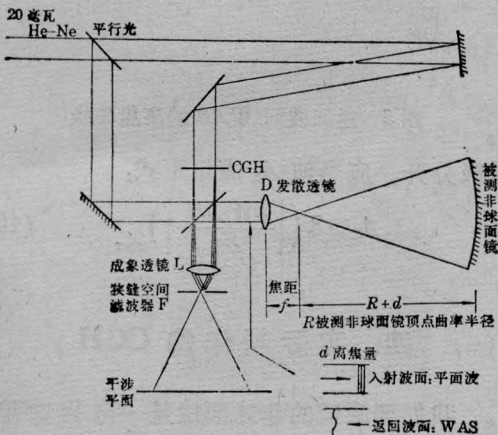


图2 CGH 干涉仪检验非球面镜

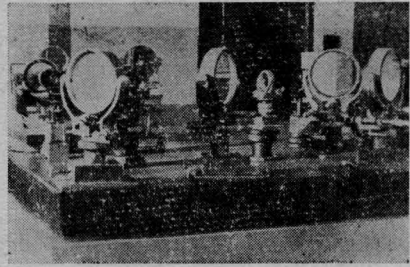


图3 实验装置

发散透镜  $D$  将平行光束先会聚后再发散，成为球面波。此球面波被被测非球面光学表面反射，成为返回波面  $WAS$ 。 $WAS$  携带有加工误差，此时  $WAR$  对  $WAS$  进行零差检验，产生直干涉条纹。条纹的弯曲、疏密和波动就反映了被测非球面镜的加工误差。

## 三、计算公式

参考图4，对于抛物面镜，有

$$Z = \frac{x^2 + y^2}{2R} \quad (2)$$

具有相同顶点曲率半径  $R$  的球面方程为

$$Z = \frac{x^2 + y^2}{2R} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{8R^3} + \frac{(x^2 + y^2)^3}{16R^5} + \dots \quad (3)$$

(3)式中的  $R$  值是可调的，这就是离焦。因此有

$$Z = \frac{x^2 + y^2}{2(R+d)} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{8(R+d)^3} + \frac{(x^2 + y^2)^3}{16(R+d)^5} + \dots \quad (4)$$

从式(4)中减去式(2)，我们得到球面和抛物面之间的面形差或矢高差：

$$\delta(x, y) = -\frac{d(x^2 + y^2)}{2R^2} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{8(R+d)^3} + \frac{(x^2 + y^2)^3}{16(R+d)^5} + \dots \quad (5)$$

并有返回波面

$$\begin{aligned}
 WAS(x, y) &= -2\delta(x, y) \\
 &= \frac{d(x^2+y^2)}{R^2} - \frac{(x^2+y^2)^2}{4(R+d)^3} \\
 &\quad - \frac{(x^2+y^2)^3}{8(R+d)^5} - \dots \quad (6)
 \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned}
 WAS(x, y) &= A_2(x^2+y^2) + A_4(x^2+y^2)^2 \\
 &\quad + A_6(x^2+y^2)^3 + \dots \quad (7)
 \end{aligned}$$

负值表示光程滞后。

参看图4。返回波面  $WAS$  在记录平面上的位相分布记为  $WAS(x, y)_p$  (以波长数表示)。我们有

$$WAS(x, y)_p = -WAS(x, y) \quad (8)$$

位相参考零点是镜面的顶点。负值表示位相滞后,正值表示位相超前。

倾斜入射平面波  $WO$  在记录平面上的位相分布为  $A_0 + A_1x$ , 也以波长数表示。干涉条纹的峰值位置应满足下式

$$\begin{aligned}
 A_0 + A_1x - WAS(x, y)_p &= A_0 + A_1x + A_2(x^2+y^2) \\
 &\quad + A_4(x^2+y^2)^2 + A_6(x^2+y^2)^3 \\
 &\quad + \dots \\
 &= m \cdot \lambda \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中  $m$  是整数, 即条纹序号。这就是我们所需要的计算公式。

在推导式(6)时, 我们假定:

- (1) 返回光线沿入射光路原路返回,
- (2) 以矢高差代替径向差。

很明显, 式(6)是一近似计算公式, 它只能在一定范围内代替精确的计算公式。

式(7)中各系数的选择依据如下:

1.  $A_2 = d/R^2$  这是离焦项。引入此项是为了使返回波面  $WAS$  的波面象差变得平缓, 降低它的变化速率。这样 CGH 用较少的取样率同样可以达到较高精度的再现波面, 并有利于各衍射级的隔离。图5表明  $A_2$  对返回波面的影响。

2.  $A_0 + A_1x$  这是载波项。  $A_1$  的值要取得足够大, 从而保证将 CGH 产生的各衍

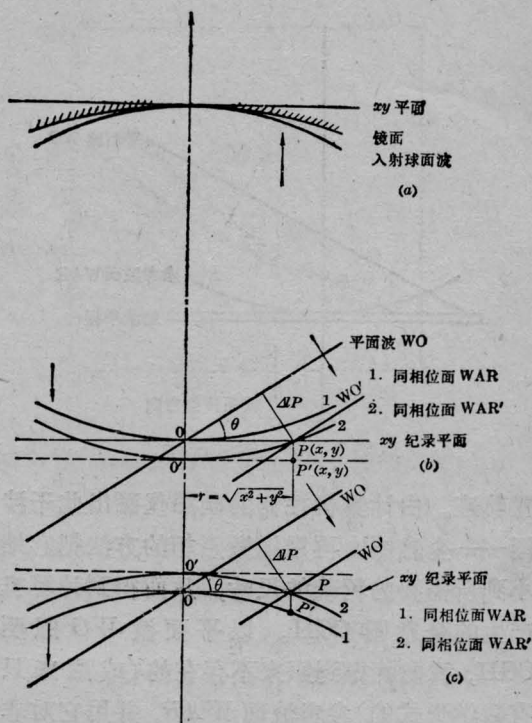


图4 记录平面上的位相分布

- (a) 入射球面波照明被测镜面
- (b) 位相超前 (c) 位相滞后

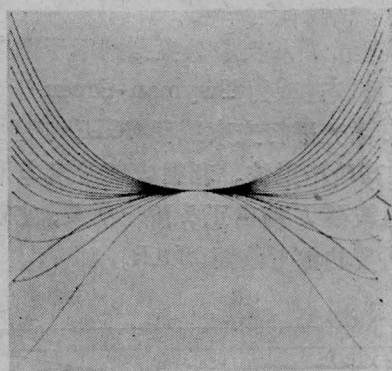


图5 返回波面  $WAS$  的离焦曲线

射级分开。应当使  $A_1$  满足下式:

$$A_1 > 3 \left( \left| \frac{\partial WAS}{\partial x} \right| \right)_{\max} \quad (10)$$

#### 四、实际制作的 CGH

我们要测试的非球面镜是一抛物面镜。  $R=2$  米, 直径  $\phi=20$  厘米。计算表明, 在这



种情况下,能够使用近似公式(6)。近似计算与精确计算相比较的结果列于表1。

表1 近似计算引入的误差

(R+d)毫米	波面最大误差 $\lambda$	条纹最大位移(毫米)
2000	0.025	0.0097
2001.25	0.006	0.0048
2001.9	0.002	0.0025

我们选用的离焦曲线就是图5上的曲线(A)。

采用以下三种方法进行计算和绘图。

1. 扫描法和手工绘图。
2. 插值法。
3. 条纹序号法(方法如下)。

参看图6。从非球面镜返回的波面是圆对称的。我们可以把位相分布写成:

$$WAS(x, y)_p = WAS(FR[n])_p \quad (11)$$

式中  $FR[n]$  是取样半径。首先计算出  $WAS(FR[n])_p$  的  $n$  个值,存入存储器。第  $m$  根干涉条纹的各点坐标值应满足式(12)和(13):

$$\begin{cases} A_0 + A_1x - WAS(FR[n])_p = m & (12) \\ y = \sqrt{FR[n]^2 - x^2} & (13) \end{cases}$$

固定干涉条纹序号  $m$ , 由式(12)求出  $x$ 。如果下式成立:

$$|x| \leq FR[n] \quad (14)$$

则保留这个  $x$  值,并用式(13)求出对应的  $Y$  值。由此,我们求出第  $m$  根干涉条纹上各点

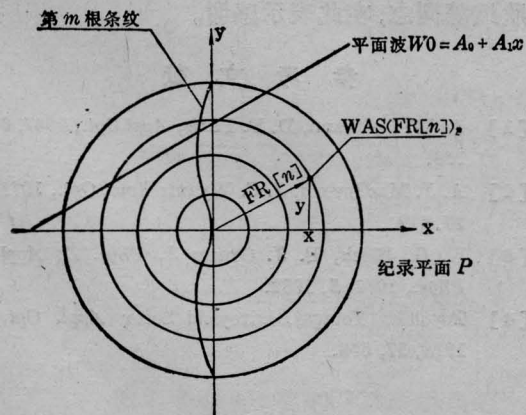


图6 用条纹序号法计算第  $m$  根条纹的轨迹

的精确位置。

图7、8就是干涉型CGH。

为了测出  $\frac{\lambda}{20}$  的镜面加工误差,CGH上每根条纹的位置误差应小于  $\frac{1}{10}$  条纹间距。这是依靠画图仪本身的精度和控制作图尺寸来保证的。

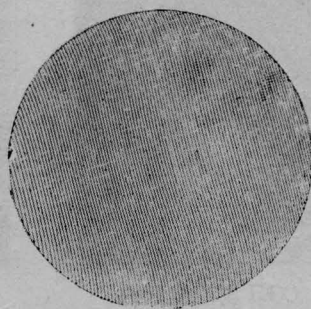


图7 手工绘制的干涉条纹型CGH

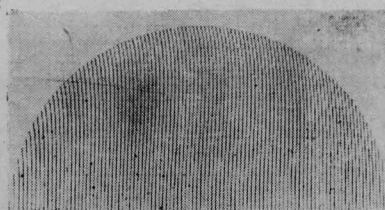


图8 机器绘制的干涉条纹型CGH

## 五、CGH再现波前的精度检验、衍射效率和检验非球面镜的结果

对CGH产生的参考波面  $WAR$  的精度检验有三种方法,测试光路如图9所示。所得结果分别示于图10~13。我们制作的CGH产生的参考波面  $WAR$  的精度达到了

$$\frac{\lambda}{8} - \frac{\lambda}{10}^{\circ}$$

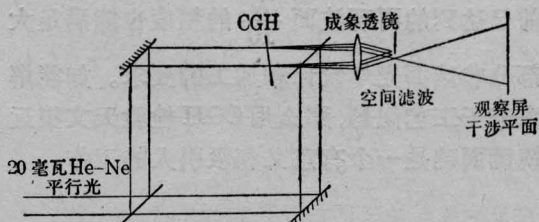


图9 CGH再现波面  $WAR$  精度检验装置

实测 CGH 的衍射效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{\text{正一级衍射功率}}{\text{入射功率}} = 7\%$$

这个值和不漂白的光学全息图的衍射效率相近。

被测抛物面镜的顶点曲率半径  $R=2$  米, 镜面直径  $\phi=20$  厘米。测试光路和实验装置示于图 2 和图 3。所得结果示于图 14~16。检验结果说明该镜局部加工误差达到  $\lambda/6$ , 镜中心偏高。

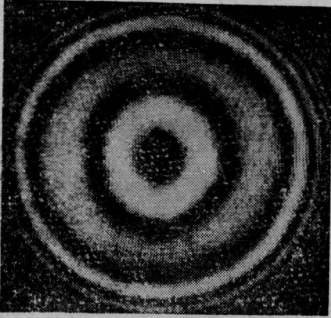


图 10 CGH 再现波面的同轴干涉检验



图 11 CGH 再现波面的倾斜干涉检验

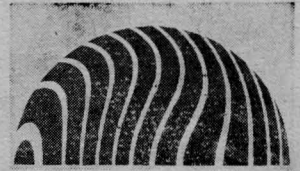


图 12 CGH 再现波面倾斜干涉标准图

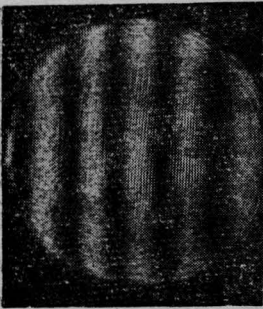


图 13 CGH 再现波面的互检

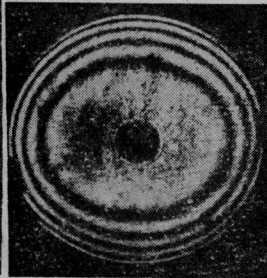


图 14 被测抛物面镜的常规干涉检验

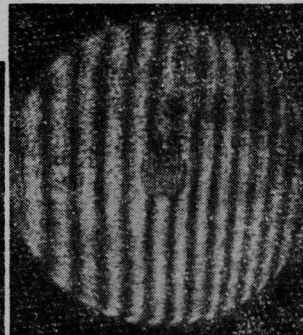


图 15 用 CGH 法检验抛物面镜



图 16 用 CGH 法检验抛物面镜

## 六、结论和展望

在 CGH 方法中, 干涉场明亮清晰、视场大、并且是定量测量的零差检验法。CGH 目前已达到的再现波面  $\frac{\lambda}{10}$  的精度也能满足大部分非球面光学设计和加工的要求。如能解决若干工艺问题, 那么用 CGH 检验天文望远镜镜面确是一个有意义和吸引人的工作。

参加过本工作的还有路敦武、顾景滨、顾欣斌等同志, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] A. W. Lohmann, D. P. Paris; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, 739.
- [2] A. J. MacGovern, J. C. Wyant; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 619.
- [3] K. G. Birch, F. J. Green; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1972, **5**, 1982.
- [4] Toyohiko Yotagai, Hiroyishi Saito; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 558.